

П.Ф. Горбачов, О.В. Макарічев, О.С. Колій, Є.В. Любий

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЗАТРИМКИ ВІЇЗДУ АВТОБУСУ З ЗУПИНОЧНОГО ПУНКТУ РОЗТАШОВАНОГО БІЛЯ РЕГУЛЬОВАНОГО ПЕРЕХРЕСТЯ

Представлена математична модель визначення часу затримки виїзду автобусу з зупиночного пункту на полосу руху з урахуванням параметрів руху транспортного потоку на ділянці дорожньої мережі та світлофорного регулювання на перехресті в зоні дії зупиночного пункту, а також з урахуванням динамічних характеристик автобусу.

Ключові слова: автобус, зупиночний пункт, інтенсивність руху, транспортний потік, час затримки, швидкість руху.

Постановка проблеми

Зупинки маршрутного транспорту повинні виступати в якості функціонального вуличного простору, де автобуси й пасажирів зливаються або розходяться.

Розміщення зупинки в міському середовищі не тривіальне питання тому що кожна зупинка є окремим випадком через структуру попиту та вплив зовнішніх умов. Тому необхідно глибоке розуміння процесів, які відбуваються в зоні дії зупиночного пункту (ЗП). Питання визначення раціонального розташування зупинок на території міста є важливим елементом транспортного планування міст, яке на сьогоднішній день, на жаль, не може вважатися до кінця вирішеним. Така ситуація вимагає розробки універсальної методики визначення раціонального розташування ЗП в умовах міста.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Моделювання руху пасажирського транспорту в зоні ЗП є об'єктом уваги багатьох дослідників. Наприклад, у роботі [1] для визначення місця розташування ЗП маршрутного пасажирського транспорту в межах площі, що утворена перехрестям вулиць і доріг запропоновано критерій – ймовірність виникнення конфліктної ситуації між транспортними та пішохідними потоками. Недоліком даного методу є те що при використанні критерію мінімуму сукупних витрат суспільства, пов'язаних з роботою ЗП маршрутного пасажирського транспорту не враховується вплив транспортних потоків (ТП) в зоні руху ЗП, а при використанні критерію ймовірності конфліктної ситуації між транспортними та пішохідними потоками для визначення місця розташування зупинки по відношенню до регульованого

перехрестя не враховується режими роботи світлофору.

Ще одна робота [2] присвячена визначенню довжини перегону маршруту міського пасажирського автомобільного транспорту, що забезпечує мінімальні витрати часу пасажирів на пересування. Головною відмінністю даної роботи від попередньої є те, що в ній враховується вплив довжини перегону на технічну швидкість, час простою маршрутних транспортних засобів (МТЗ) на ЗП та величину інтервалу між рухом транспортних засобів (ТЗ). Для вирішення цільової функції автором розроблено багатofакторну регресійну модель зміни технічної швидкості при русі по перегону маршруту.

При розрахунку пропускної здатності та геометричних параметрів ЗП в роботі [3] автор пропонує враховувати імовірнісні характеристики ТП, що за ствердженням автора дозволить підвищити ефективність організації руху МТЗ на них. Інакше кажучи зниження затримок на ЗП, призведе до збільшення експлуатаційної швидкості та продуктивності МТЗ. Для цього в роботі час звільнення ЗП визначався виходячи з умови, що на нього впливають три фактори: інтенсивність потоку руху на крайній правій смузі, клас ТЗ та ситуація, при якій доводилося або не доводилося робити маневр по обгону ТЗ. Для встановлення значень перерахованих параметрів був використаний регресійний аналіз.

Узагальнюючи описані вище методики можна виділити їх головний недолік, а саме використання регресійних рівнянь, що мають недостатню теоретичну обґрунтованість та обмежену сферу застосування.

У [4] один з найбільш важливих параметрів функціонування зупиночних пунктів є час затримки

маршрутного транспортного засобу, який визначається як

$$t_d = P_a \cdot t_a + P_b \cdot t_b + t_{oc}, \quad (1)$$

де P_a – кількість пасажирів, що виходять, чол.;

t_a – час висадки одного пасажирів, с;

P_b – кількість пасажирів, що входять, чол.;

t_b – час посадки одного пасажирів, с;

t_{oc} – час відкриття та закриття дверей, с.

Але на нашу думку таке формулювання затримки маршрутного транспортного засобу не є повним. Для більш точного розрахунку потрібно також враховувати час затримки від'їзду маршрутного транспорту від ЗП після закриття дверей. Такі затримки виникають в наслідок перешкоджання транспортними засобами які рухаються паралельно виїзду маршрутного транспортного засобу.

Постановка завдання

Однією з причин недостатньо ефективного використання рухомого складу на маршрутах є нераціональне розміщення ЗП на маршрутах. Усунення цього недоліку дозволить пасажиром здійснювати поїздки в маршрутному транспорті за менший час. Це може бути досягнуто завдяки скороченню затримок при виїзді МТЗ з ЗП після закінчення посадки та висадки пасажирів. Треба зазначити, що затримки виїзду МТЗ можуть виникати у двох випадках: коли зупинка розташована в заїзному "кармані" або перед зупинкою припарковано автомобілі, які МТЗ змушений об'їжджати. В обох випадках МТЗ виконує небезпечний маневр виїзду на смугу руху по якій рухається потік ТЗ.

Виклад основного матеріалу

Визначення місця розташування зупиночних пунктів відносно регульованих перехресть

На практиці в умовах міста час затримки виїзду МТЗ залежить від розташування ЗП до чи після регульованого перехрестя. Для побудови адекватної моделі необхідно врахувати всі можливі варіантів ситуації на дорозі при виїзді МТЗ з карману зупиночного пункту (КЗП), які залежать від сигналу світлофора та кількості автомобілів в черзі перед ним. При розміщенні зупинки перед перехрестям якщо увімкнено забороняючий сигнал, а черга ТЗ перед перехрестя не дозволяє виїхати МТЗ на смугу руху виникає ситуація в якій МТЗ вимушений простоювати до моменту закінчення забороняючого сигналу та звільнення місця в черзі. При цьому ТЗ,

які стояли в черзі за зупинкою пропускають МТЗ. Якщо кількість ТЗ в черзі достатньо мало МТЗ виїжджає в потік ТЗ, що уповільнюючись наближається до черги перед світлофором. При вмиканні дозволяючого сигналу МТЗ пропускає всі ТЗ з черги, після чого виїжджає в потік автомобілів, що уповільнюючись наближаються до черги. Якщо кількість ТЗ в черзі не перешкоджає виїзду МТЗ, то в цій ситуації МТЗ виїжджає в потік автомобілів, швидкість яких не змінюється.

При розміщенні зупинки за перехрестям якщо увімкнено забороняючий сигнал для потоку поголовній дорозі МТЗ виїжджає в потік автомобілів, які здійснюють лівий і правий поворот з другорядної дороги. З іншого боку при включенні дозволяючого сигналу світлофора МТЗ виїжджає в потік ТЗ, які почали рух після зміни сигналу з забороняючого на дозволяючий або в потік ТЗ які наздоганяють ТЗ, які почали рух після зміни сигналу. Для визначення повної ймовірності часу затримки виїзду МТЗ з КЗП необхідним є врахування всіх ситуацій на дорозі, які зазначені вище.

Повна ймовірність середнього часу затримки виїзду МТЗ з КЗП, який розташований до перехрестя має наступний вид

$$\begin{aligned} \bar{T}_o = & \frac{t_u}{t_u} \left\{ P_{k \geq n} \left[\frac{t_u}{2} + t_p(n) \right] + \sum_{k=0}^{n-1} P_k \cdot \bar{t}_u(V_u, \lambda) \right\} + \\ & + \frac{t_3}{t_u} \left\{ P_{k \geq n} \cdot (k \cdot \Delta t + (k - n) \cdot \Delta t + \right. \\ & \left. + \bar{t}_3(V_3(n-1), \lambda)) + \sum_{k=0}^{n-1} P_k \cdot \bar{t}_3(V_3(k), \lambda) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

де t_u – час такту забороняючого сигналу світлофора, с;

t_3 – час такту зеленого сигналу світлофора, с;

t_u – час циклу світлофора, с;

$t_p(n)$ – середній час звільнення автомобілем місця в черзі, с;

\bar{t}_u, \bar{t}_3 – математичне очікування затримки виїзду МТЗ з зупинки на забороняючий та дозволяючий сигнал світлофора відповідно, с;

V_u – швидкість потоку на забороняючий сигнал світлофора, м/с;

Δt – час звільнення одним автомобілем свого місця в черзі, с;

λ – інтенсивність потоку автомобілів, од/с;

$V_2(n-1)$ – швидкість потоку з урахуванням уповільнення через чергу з кількістю $(n - 1)$ автомобілів, яка почала рух на дозволяючий сигнал, м/с;

$V_2(k)$ – швидкість потоку з урахуванням уповільнення через чергу з кількістю (k)

автомобілів, яка почала рух на дозволяючий сигнал, м/с;

$P_{k \geq n}$ – ймовірність того, що всі місця перед світлофором до ЗП зайняті;

P_k – ймовірність того, що в черзі буде k автомобілів при цьому кількість вільних місць буде рівно $n - k$ при $k < n$;

n – кількість місць для зупинки на ділянці від світлофора до ЗП під час забороняючого сигналу світлофора, од;

k – кількість автомобілів у черзі перед світлофором на забороняючий сигнал, од.

Математичне сподівання часу затримки виїзду МТЗ з КЗП, який розташовано за перехрестям дорівнює

$$\bar{T}_3 = \frac{t_3}{t_4} \left\{ \sum_{k=0}^{K_0} P_k \cdot \bar{t}_3(\lambda_3(k)) \right\} + \frac{t_4}{t_4} \cdot \bar{t}_4(V_n(l, k, a_1)), \quad (3)$$

де λ_3 – інтенсивність ТП на зелене світло, од./с;

l – відстань від перехрестя, на якій розташована зупинка, м;

a_1 – прискорення автомобіля, м/с².

Середній час затримки виїзду МТЗ з КЗП у вільне вікно ТП

$$\bar{t}_i = \frac{1}{\lambda} (e^{\tau(v_i)\lambda_i} - 1) - \tau(v_i), \quad (4)$$

де $\tau(v_i)$ – час виїзду МТЗ з КЗП у вільне вікно ТП, с;

V_i – швидкість ТП на зелений або червоний сигнал світлофора, м/с;

i – індекс червоного або зеленого сигналу світлофора.

$$\tau(v_i) = \frac{V_i}{a}, \quad (5)$$

де a – прискорення МТЗ, м/с².

Ймовірність того, що всі місця перед світлофором до ЗП заповнені

$$P_{k \geq n} = 1 - \frac{1 + \rho + \rho^2 + \dots + \rho^{n-1}}{1 + \rho + \rho^2 + \rho^k + \dots + \rho^{K_0}}, \quad (6)$$

де ρ – ймовірність створення черги;

K_0 – максимальна кількість автомобілів в черзі, од.

$$\rho = \frac{\lambda \cdot t_u}{t_3 \cdot \mu} < 1 \quad (7)$$

Ймовірність того, що в черзі буде k автомобілів при цьому кількість вільних місць буде рівно $n - k$ при $k < n$.

$$P_k = \frac{\rho^k}{1 + \rho + \rho^2 + \rho^k + \dots + \rho^{K_0}}, \quad (8)$$

де μ – інтенсивність роз'їзду автомобілів з перехрестя, од/с.

По формулі повної ймовірності середній час затримки виїзду МТЗ з КЗП за перехрестям буде мати вигляд

Експериментальне дослідження визначення місця розташування зупиночного пункту

Час затримки виїзду МТЗ перебуває під комплексним впливом різноманітних факторів, ступінь впливу яких неоднаковий. Але для досліджень в цій роботі головним є установити залежності часу затримки виїзду МТЗ від відстані розташування зупинки по відношенню до світлофора та інтенсивності ТП.

Мінімальна відстань розташування зупинки від перехрестя приймалось відповідно до норм [5]. Так як об'єктом дослідження в нашому випадку було обрано центральну частину м. Харкова, а дальність пішохідних підходів у загальноміському центрі до найближчої зупинки від об'єктів масового відвідування повинна бути не більш 250 м [6], то для недопущення впливу двох зупинок одночасно максимальна дальність зупинки від перехрестя було прийнято 100м.

В якості вхідних даних для побудови залежності використовувалися значення інтенсивності для головної дороги 548 авт./год, та швидкості 27 км/год. Результати проведених розрахунків залежності часу затримки виїзду МТЗ з КЗП від відстані розташування зупинки від перехрестя наведено на рис. 1.

З рис. 1 видно, що вплив параметра відстані між ЗП і перехрестям неоднаковий в залежності від розташування ЗП до чи після регульованого перехрестя.

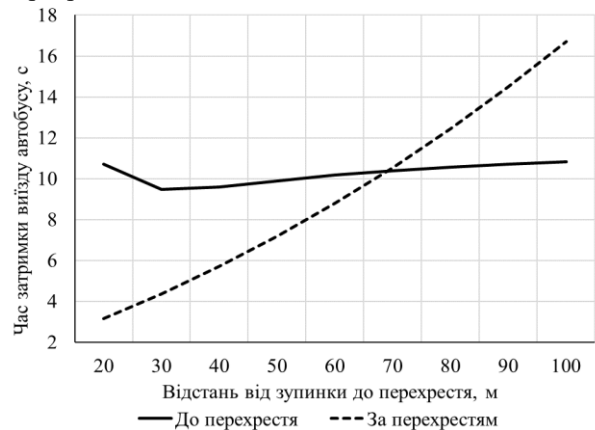


Рис.1. Залежність часу затримки від відстані розташування зупинки

За результатами досліджень можливо стверджувати, що найбільш доцільним є розміщення зупинки на мінімально допустимій відстані за перехрестям, а при розміщенні зупинки до перехрестя на відстані 30 м.

Таким чином, запропонований критерій у певній мірі надає рекомендації щодо розташування ЗП відносно регульованих перехресть та дозволяє визначити відстань віддалення ЗП від перехрестя при його розташуванні у конкретних містобудівних та архітектурних умовах біля перехрестя. Треба зазначити, що при практичному застосуванні даної методики треба також враховувати вплив попереднього або наступного перехрестя, так як при значному віддаленні зупинки від перехрестя вона може попасти в зону впливу іншого перехрестя.

Для цього було прийнято, що межею впливу перехрестя на автомобілі, які віддаляються від перехрестя є відстань на якій, автомобілі завершують прискорення і виходять на постійну швидкість руху

$$L_v = \frac{V_a^2}{2 \cdot a_1} \quad (9)$$

З іншого боку відстань на якій, перехрестя починає впливати на автомобілі, які наближаються до перехрестя визначається довжиною черги автомобілів перед світлофором цього перехрестя, при цьому відстань з якої автомобілі починають гальмувати при наближенні до черги не враховується

$$L_v = n_{cp} \cdot (l_a + l_0), \quad (10)$$

де n_{cp} – середня кількість автомобілів в черзі, од;

l_a – середня довжина легкового автомобіля, м;

l_0 – середня довжина дистанції між автомобілями, м.

$$n_{cp} = \sum_{k=1}^{K_0} \frac{k \cdot \rho^k}{1 + \rho + \rho^2 + \dots + \rho^{K_0}}, \quad (11)$$

де k – кількість автомобілів, од.;

ρ – ймовірність створення черги (7);

K_0 – максимальна кількість автомобілів в черзі, од.

Для практичного застосування розробленої методики на найбільш звантажених вулицях Пушкінській, Сумській, Клочківській та проспекті Науки було проведено дослідження часу затримки виїзду МТЗ з ЗП. Попередні дослідження показали, що на вул. Клочківській та просп. Науки затримок виїзду МТЗ з зупинок немає. Це пояснюється тим,

що ці вулиці мають більш ніж дві смуги руху, що дозволяє автомобілям маневрувати та не заважати виїзду МТЗ, крім того більшість зупинок на цих вулицях розташовані за перехрестям на мінімальній відстані, що за нашими розрахунками є раціональним місцем з точки зору мінімум часу затримки виїзду МТЗ. Виходячи з цього, сферою застосування побудованих моделей є раціональне розміщення зупиночних пунктів на вузьких ділянках ВДМ з одною або двома смугами руху, де зупиночні пункти обладнані заїзними карманами або перед зупинкою дозволена паркова автомобілів на крайній правій смузі в наслідок чого МТЗ змушений маневрувати для продовження руху по маршруту.

Серії досліджень проводились на вулицях Пушкінській та Сумській за допомогою відео спостереження. Камера була встановлена в салоні МТЗ, яка фіксувала час прибуття на зупинку, час закінчення посадки та висадки пасажирів та час звільнення зупиночного пункту. За результатами обробки відео матеріалів були визначені зупинки з найбільшим часом затримки, які представлені в табл. 1 - 2.

Таблиця 1

Середній час затримки виїзду МТЗ на вул. Сумську

Адреса зупинки	Час затримки виїзду, с
Напрямок руху від центру міста	
вул. Сумська, 80	13,7
Напрямок руху до центру міста	
вул. Сумська, 43Б	15,3
вул. Сумська, 48	77,9
вул. Сумська, 15	25,8

Таблиця 2

Середній час затримки виїзду МТЗ на вул. Пушкінську

Адреса зупинки	Час затримки виїзду, с
Напрямок руху від центру міста	
вул. Пушкінська, 50/52	6
вул. Пушкінська, 74А	7,2
Напрямок руху до центру міста	
вул. Пушкінська, 49	5,5
вул. Пушкінська, 28	25,5

У результаті проведених досліджень було зроблено висновок про необхідність передислокації ЗП з максимальними затримками виїзду МТЗ.

Розробка плану передислокації проводився з урахуванням місцевих можливостей та фізичними можливостями такої передислокації. План передислокації представлено табл. 3 та 4.

Таблиця 3

Розміщення зупиночних пунктів на вул. Сумська

Адреса зупинки	Місце розташування		Відстань від перехрестя, м	
	Факт	План	Факт	План
вул. Сумська, 15	за	за	160	20
вул. Сумська, 48	за	за	200	20
вул. Сумська, 43Б	до	до	72,6	30
вул. Сумська, 80	за	за	61	20

Таблиця 4

Розміщення зупиночних пунктів на вул. Пушкінська

Адреса зупинки	Місце розташування		Відстань від перехрестя, м	
	Факт	План	Факт	План
вул. Пушкінська, 28	до	до	13,9	30
вул. Пушкінська, 50/52	до	за	28,3	20
вул. Пушкінська, 49	до	за	48,4	20
вул. Пушкінська, 74А	до	за	23,6	40

Після проведення розрахунків за розробленими аналітичними моделями було одержано наступні результати, табл. 5.

Таблиця 5

Середній час затримки виїзду МТЗ

Адреса зупинки	Час затримки виїзду МТЗ, с	
	Натурні дослідження	Після корегування розташування зупинок
Середнє значення	22,1	5,7
Загалом	176,9	45,64

В результаті перепланування розміщення зазначених зупиночних пунктів вдалося зменшити

час затримки виїзду МТЗ з ЗП в середньому з 22 до 6 секунд, тобто на 73%

Висновки

За результатами досліджень було встановлено, що найбільш ефективним з точки зору мінімальних витрат часу на пересування пасажирів є розміщення зупинки на мінімально допустимій відстані за перехрестям, а при розміщенні зупинки до перехрестя на відстані від 30 м. Також було встановлено, що збільшення інтенсивності руху ТП затрудняє виїзд МТЗ з зупинки в наслідок чого спостерігається збільшення часу затримки виїзду. За рахунок переміщення ЗП на вулицях Сумська та Пушкінська вдалося зменшити час затримки виїзду МТЗ в середньому з 22 до 6 секунд. Отримані результати дозволяють зробити висновки що за допомогою розроблених математичних моделей можливо визначати раціональне місце розташування зупиночних пунктів по відношенню до регульованого перехрестя за рахунок мінімізації часу затримки виїзду МТЗ з ЗП після закінчення посадки та висадки пасажирів.

Література

1. Кажяев, А. А. Снижение конфликтных ситуаций на остановочных пунктах маршрутных сетей городского пассажирского транспорта [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.01 / А. А. Кажяев. – М., 2012. – 19 с.
2. Калюжний, М. В. Визначення довжини перегону маршруту міського пасажирського автомобільного транспорту [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / М. В. Калюжний; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х., 2011. – 21 с.
3. Зедгенизов, А. В. Повышение эффективности дорожного движения на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта [Текст] : автореф. дис. на получение науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.10 / А. В. Зедгенизов. – Иркутск, 2008. – 20 с.
4. Highway Capacity Manual-2000. (2000) Washington, D.C., United States of America.
5. Споруди транспорту. Вулиці та дороги населених пунктів [Текст] : ДБН В.2.3–5–2001. – Чинний від 2001–08–01. – К.: Управлінням інженерного захисту територій та промислової забудови Держбуд України, 2001. – 49 с.
6. ДБН Б.2.2-12:2019 Планування та забудова територій. [Текст] – Держбуд України : Київ, 2019. – 52 с.

References

1. Kazhaev, A. A. (2012) Decrease in conflict situations at stopping points of route networks of urban passenger transport. Moscow, Russian Federation.
2. Kaliuzhnyi, M. V. (2011) Determining the length of the race route of urban passenger road transport. Kharkiv, Ukraine.
3. Zedhenysov, A. V. (2008) Improving the efficiency of traffic at stopping points of urban passenger transport. Irkutsk, Russian Federation.

4. Highway Capacity Manual-2000. (2000) Washington, D.C., United States of America.
5. Transport facilities. Streets and roads of settlements. (2001) Kiev, Ukraine.
6. Planning and development of territories. (2019) Kiev, Ukraine.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.С. Наглюк, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна.

Автор: ГОРБАЧОВ Петро Федорович
доктор технічних наук, професор
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – gorbachov.pf@gmail.com

Автор: МАКАРІЧЕВ Олександр Володимирович
доктор фізико-математичних наук, професор
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – amsol2904@gmail.com

Автор: КОЛІЙ Олександр Сергійович
кандидат технічних наук, доцент
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – forgemest@ukr.net

Автор: ЛЮБИЙ Євген Володимирович
кандидат технічних наук, доцент
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – lion.tsl.khadi@gmail.com

DETERMINATION OF THE DELAY TIME OF THE BUS DEPARTURE FROM THE STOP POINT LOCATED NEAR A REGULATED CROSSROADS

P. Gorbachov, O. Makarichev, O. Koliy, Y. Liubyi

Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

The article is devoted to solving scientific and applied problems of determining the rational location of stopping points at the entrance or exit from controlled intersections. Analysis of approaches and methods to the determination of rational location of stopping points showed that they are mostly based on the goals of minimizing the time for passenger transportation or maximizing the performance of transport systems functioning. With that, the question of determining the time of delay of vehicle departure from the stopping point bottleneck after the embarkation and disembarkation of passengers is paid very little attention to. Currently, there are only regression models available that cannot claim to be universal and their use in transport planning requires similar conditions of functioning with the object, where statistic data were collected.

The conducted analysis allowed determining the trend of basic research, namely, assessment of the influence of traffic flow parameters on the delay time of route transport departure from the stopping point bottleneck in the area adjacent to the controlled intersection. The process of delay occurrence at the exit of route transport from the stopping point bottleneck was formalized as the object of study thanks to which there was built an analytical model to determine the time of delay of route transport departure from the stopping point bottleneck.

There were investigated two options for placement of a stopping point at the entrance and exit from the intersection. According to the results of calculations, it was determined that the delay time of route transport departure from the stopping point was influenced by many factors, whose influence varies depending on the location of the stopping point at the entrance and exit from a controlled intersection.

By the results of researches one can be affirm that the most expedient is the placement of a stopping point at the minimum acceptable distance from the intersection, and it is recommended to locate a stopping point at a distance of 30 m at the entrance to the intersection.

Keywords: stop, route vehicles, traffic flow, regulated intersections, traffic, latency, capacity transport areas.